

**СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

**SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY
OF THE SHIP**

УДК 629.124.79

DOI: 10.37890/jwt.vi73.311

**Прогнозирование ходкости грузопассажирского парома при
движении в битых льдах**

Е.М. Грамузов¹

ORCID: 0000-0003-1549-2063

Н.В. Калинина¹

ORCID: 0000-0001-8474-9665

А.Г. Ларин¹

ORCID: 0000-0001-6841-9180

Е.М. Ларина¹

ORCID: 0000-0003-3052-2080

¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований ледовой ходкости грузопассажирского парома проекта CNF22 с бульбообразной носовой оконечностью, транцевой кормой, спроектированного на класс Российского морского регистра судоходства с ледовыми усилениями Ice2 в опытовом бассейне. Обоснован выбор модели битого льда. Получены кривые сопротивления модели судна на чистой глубокой воде и в битом льду толщиной 0,5 м сплоченностью 4, 6, 8 баллов при движении носом и кормой вперед. Представлен алгоритм пересчета результатов испытаний с модели на натурное судно. Спрогнозирована ходкость судна при движении на чистой воде и в мелкобитом льду.

Ключевые слова: битый лед, сплоченность льда, ледовое сопротивление, опытовый бассейн, теория моделирования, модельный лед, кривые ледопроеходимости.

**Forecasting the propulsion of a cargo-passenger ferry when
moving in broken ice**

Evgeny M. Gramuzov¹

ORCID: 0000-0003-1549-2063

Nadezhda V. Kalinina¹

ORCID: 0000-0001-8474-9665

Alexander G. Larin¹

ORCID: 0000-0001-6841-9180

Elizaveta M. Larina¹

ORCID: 0000-0003-3052-2080

¹*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev*

Abstract. The results of experimental studies of the ice propulsion of the CNF22 project passenger-and-freight ferry model are given in the article. The vessel has a bulbous bow, a transom stern and is designed for the class of the Russian Maritime Register of Shipping with ice reinforcements Ice2 in test basin. The choice of the broken ice model is justified in the article. The resistance curves of the vessel model in clear deep water and in broken ice 0.5 m thick with ice concentration of 4, 6, 8 points when moving bow and stern forward were obtained. An algorithm for recalculating test results from a model to a full-scale vessel is presented. The propulsion of the vessel when moving on clear water and in broken ice is predicted.

Keywords: broken ice, ice cohesion, ice resistance, test basin, modeling theory, model ice, icebreaking curves.

Введение

Значительная часть прибрежной территории России, перспективная с точки зрения морской коммерческой деятельности, находится в районах с традиционно низкими зимними температурами, серьёзно затрудняющими судоходство. Замерзание морей делает коммерческое судоходство невозможным пять-восемь месяцев в году. Рост грузооборота приводит к необходимости продления навигации как одному из важных резервов удовлетворения потребностей перевозок, поскольку сезонность речного и морского транспорта ограничивает провозную способность, ведёт к увеличению нагрузки на другие виды транспорта.

Для организации регулярного пассажирского сообщения между морскими портами Дальневосточного федерального округа (Камчаткой и Курилами) спроектировано и строится грузопассажирское судно (паром) проекта CNF22. Сейчас эту функцию в основном выполняют авиaperевозки.

Автомобильно-пассажирский паром с бульбообразной носовой оконечностью и транцевой кормой, с избыточным надводным бортом, с носовым расположением жилой надстройки, машинным отделением в корме, с двухвинтовой дизельной пропульсивной установкой, кормовым и носовым подруливающими устройствами, оборудованный угловой аппарелью, расположенной в корме по правому борту, предназначен для перевозки 150 пассажиров, легковых и грузовых автомобилей, автобусов, колесной и гусеничной автотехники, 20-ти и 40-футовых контейнеров, с кормовой схемой грузообработки.

Судно проектируется и строится на класс Российского морского регистра судоходства с ледовыми усилениями Ice2 и предназначено для эксплуатации в Японском, Охотском и Беринговом морях, включая острова Курильской гряды и прилегающие участки Тихого океана в мелкобитом разреженном льду неарктических морей толщиной до 0,5 м. Натурные испытания судна в ледовых условиях являются достоверным, но дорогим способом прогнозирования его ходкости. Следовательно, прибегают к испытаниям моделей судов в опытовых бассейнах. Поэтому актуальным является прогнозирование ледовой ходкости судна при движении в битых льдах различной сплоченности при движении как носом, так и кормой вперед в опытовом бассейне.

Моделирование ледовых условий в опытовом бассейне

Процесс взаимодействия судов с битым льдом носит сложный характер. Его изучение связано с определенными трудностями, которые обусловлены тем, что структура льда имеет большое разнообразие. Свойства льда зависят от истории образования, температуры окружающей среды, солёности воды и других природных факторов. Поэтому поиск материалов, имитирующих лед, технологии проведения модельных испытаний, способы пересчетов результатов с модели на натуру постоянно совершенствуется. Основной проблемой моделирования ледового

сопротивления является создание физической модели льда, адекватно отображающей его взаимодействие с судами в натуральных условиях [1, 2, 3, 4, 5].

Условия подобия при моделировании в битом льду определяются зависимостями [1]:

$$\frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \dots = \frac{h_n}{h_m} = \lambda; Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \text{idem}; \rho_{лн} = \rho_{лм}; S = \text{idem}; f = \text{idem} \quad (1)$$

где L, B – линейные размеры судна; h – толщина льда; Fr – число Фруда; λ – масштаб модели; $\rho_{лf}$ – коэффициент трения; S – сплоченность льда; «н» - индекс для натурального судна и «м» - для модели.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают достаточно сложным точно и определенно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку (в том числе толщину, форму и размеры льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с осредненными характеристиками. Условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщин, сплоченности, ширине канала, плотности и коэффициента трения обломков льда о корпус).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью плиток из полиэтилена высокого давления одинаковой формы и размеров $l/h = \text{const}$ (l – размер обломков в плане) и обеспечить повторяемость опытов.

По данным [1, 6, 7, 8] плотность однолетнего морского льда составляет $\rho_{л} = 0,86 \dots 0,92 \text{ т/м}^3$, коэффициент трения льда о сталь составляет $0,08 \dots 0,12$.

У полиэтилена высокого давления плотность близка к $0,92 \text{ т/м}^3$. Коэффициент трения полиэтилена о корпус окрашенной модели составляет $0,11 \pm 0,13$ [5]. Учитывая нестабильность физико-механических свойств натурального льда, зависящих от температуры, истории и времени намерзания, погодных условий можно считать условия (1) удовлетворительными для моделирования.

Модель автомобильно-пассажирского парома

Для прогнозирования ледовой ходкости парома (рис. 1) был выбран масштаб модели 1:50 (рис. 2) в соответствии с теоретическим чертежом судна. Основные характеристики натурального судна и модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные элементы судна проекта CNF22 и модели

Характеристики	Судно	Модель (М 1:50)
Длина расчетная, м	110,10	2,20
Ширина, м	17,50	0,35
Осадка на мидель шпангоуте, м	4,50	0,09
Площадь смоченной поверхности, м ²	2380	0,952
Водоизмещение	5902 т	47,22 кг
Мощность главных двигателей, кВт	2x3500	-
Скорость на глубокой тихой воде при 85% мощности главных двигателей, уз	17,50	2,48

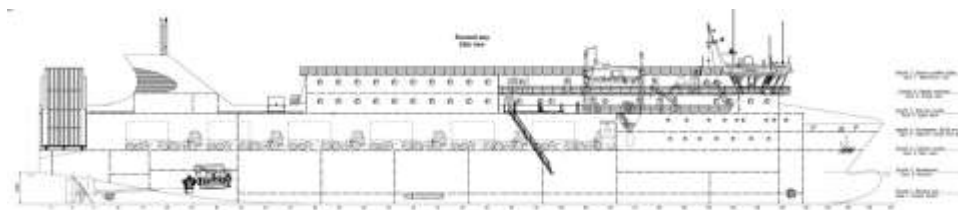


Рис. 1. Боковой вид автомобильно-пассажирского парома проекта CNF22

Испытания модели судна в опытовом бассейне

Испытания модели судна в чистой воде и битом льду проводились в опытовом бассейне с размерами: длина 50,0 м; ширина 5,0 м; глубина воды 2,5 м.

Такие испытания не требуют искусственного или естественного холода и могут проводиться в любое время года. Методика и технология проведения испытаний изложена в [2, 5]. Для проведения исследований использована буксировочная система гравитационного типа. На рис. 3 и рис. 4 приведен общий вид бассейна с чистой водой и с модельным льдом сплоченностью 4 балла.

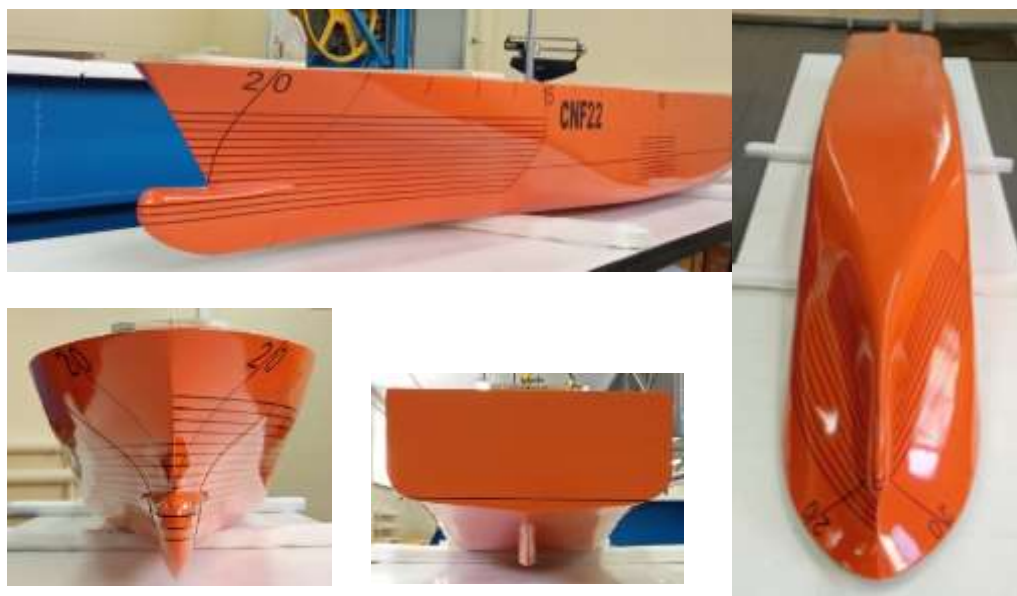


Рис. 2. Фото модели судна проекта CNF22



Рис. 3. Общий вид опытового бассейна



Рис. 4. Поле битого льда сплоченностью 4 балла в опытовом бассейне

Во время испытаний измерялись следующие величины:

- сопротивление окружающей среды (вода и лед) – весом буксировочного груза (при установившемся движении),
- скорость движения модели,
- температура воздуха и воды,
- глубина воды в бассейне,
- размеры модели льда,
- сплоченность битого льда.

Испытания модели судна проведены при движении на чистой глубокой воде и в битом льду различной сплоченности 4, 6, 8 баллов при движении носом и кормой вперед. Битый лед имитирован плитками полиэтилена высокого давления толщиной 10 мм, имеющими форму в плане в виде равнобедренного прямоугольного треугольника с катетами 100 мм. Для натурального льда это соответствует толщине 50 см.

Фрагменты испытаний приведены на рис. 5...8.

Результаты испытаний модели судна представлены в виде кривых сопротивления при движении носом и кормой вперед (рис. 9, 10).



Рис. 5. Фрагмент испытаний модели при движении носом на скорости для натуре ~ 8 узлов



Рис. 6. Фрагменты испытаний при движении модели кормой во льду сплоченностью 4 балла и скоростью ~ 6 уз.



Рис. 7. Фрагменты движения модели носом во льду сплоченностью 6 баллов и скоростью ~ 6 уз.



Рис. 8. Фрагменты движения модели носом во льду сплоченностью 8 баллов и скоростью ~ 12 уз.

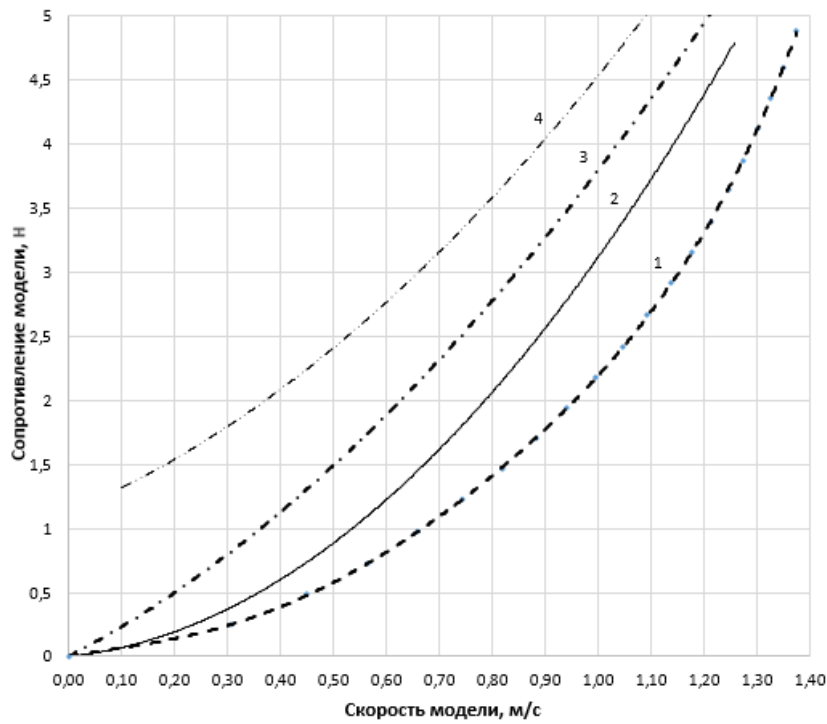


Рис. 9. Буксировочные кривые при движении модели носом:
1 - чистая вода; 2 – сплоченность льда 4 балла;
3 – сплоченность льда 6 баллов; 4 – сплоченность льда 8 баллов

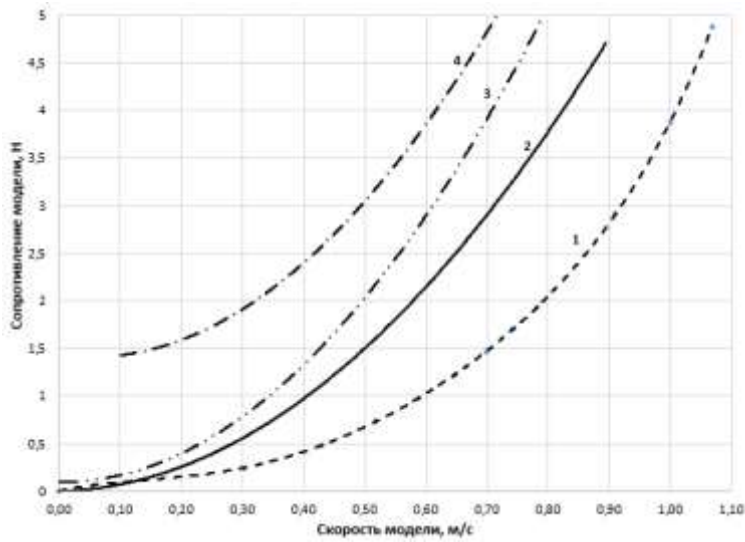


Рис. 10. Буксировочные кривые при движении модели кормой:
1 - чистая вода; 2 – сплоченность льда 4 балла;
3 – сплоченность льда 6 баллов; 4 – сплоченность льда 8 баллов

Пересчет результатов испытаний с модели на натуру

Пересчет гидродинамического сопротивления при движении на чистой воде с модели на натурное судно осуществляется обычными методами теории корабля.

При движении в битом льду пересчет результатов испытаний на натуру для воды и льда проводится по разным условиям моделирования. При этом необходимо выделить чистое ледовое сопротивление, которое связано с взаимодействием модели судна со льдом [1].

Чистое ледовое сопротивление модели:

$$R_M^{чл} = R_M - R_M^B,$$

где R_M – полное сопротивление модели в бассейне; R_M^B – сопротивление модели на чистой воде.

При выполнении условий моделирования чистое ледовое сопротивление $R_M^{чл}$ пересчитывается по закону подобия Фруда [1].

С другой стороны, чистое ледовое сопротивление можно представить в виде:

$$R_M^{чл} = R_M^{пр} + R_M^{ск},$$

где $R_M^{пр}$ – прямое сопротивление, не зависящее от скорости, определяется при скорости $v \rightarrow 0$; $R_M^{ск}$ – скоростное сопротивление, зависящее от скорости.

Испытания модели проводятся в пресной воде плотностью $\rho_M = 1,00 \text{ т/м}^3$, а эксплуатация судна – в морской. Плотность морской воды зависит от солености, температуры и глубины. В расчетах плотность морской воды принята $\rho_H = 1,025 \text{ т/м}^3$.

Прямое сопротивление льда пересчитывается по формуле:

$$R_H^{пр} = \lambda^3 \frac{\rho_B^H - \rho_L^H}{\rho_B^M - \rho_L^M} R_M. \tag{2}$$

Скоростное сопротивление в обломках льда пересчитывается так:

$$R_H^{ск} = \frac{\rho_B^H}{\rho_B^M} \lambda^3 R_M^{ск}. \tag{3}$$

Чистое ледовое сопротивление с модели на натуру пересчитываются по формуле

$$R_H^{чл} = R_H^{пр} + R_H^{ск}. \tag{4}$$

Полное сопротивление воды и обломков

$$R = R_{чл} + R_B.$$

Алгоритм пересчета результатов модельных испытаний на натуру следующий:

- определение скорости движения и сопротивления модели v_M в поле битого льда R_M ;
- определение сопротивления воды при движении модели R_M^B ;
- определение чистого ледового сопротивления $R_M^{чл} = R_M - R_M^B$;
- пересчет на натуру прямой и скоростной составляющих сопротивления в битом льду по (2) ... (4);
- пересчет на натуру сопротивление воды;
- определение ледового сопротивления натуре $R_H = R_H^{чл} + R_H^B$;
- построение зависимостей ледового сопротивления от скорости движения для различной сплоченности льда.

Кривые сопротивления при движении судна носом приведены на рис. 11. На этом же рисунке представлена тяга гребных винтов. Кривые сопротивления при движении судна кормой вперед приведены на рис. 12. На заднем ходу тяга принята 0,8 от тяги на переднем ходу [9].

Результаты испытаний

Точки пересечения кривых сопротивления и тяги винтов дают значения достижимых скоростей (диаграммы ледопроходимости) на расчетных режимах и представлены на рис.13 при движении судна носом и кормой вперед.

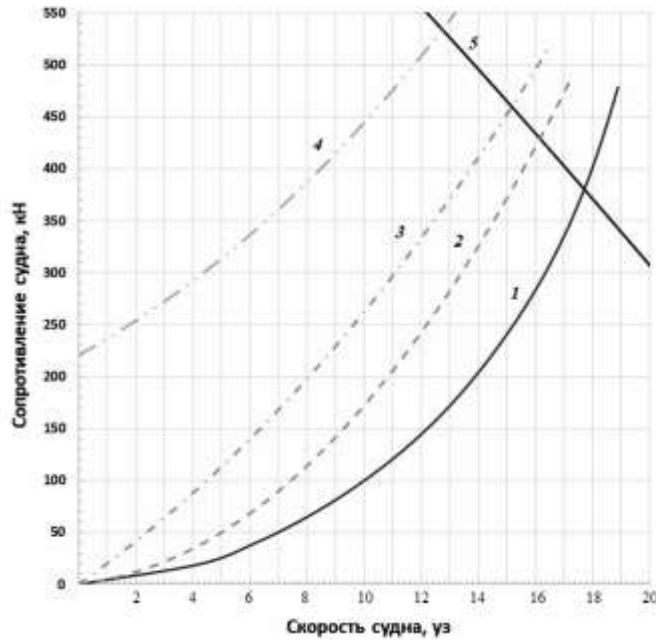


Рис. 11. Кривые полного сопротивления при движении судна носом:

- 1 - сопротивление воды и воздуха;
- 2 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 4 балла;
- 3 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 6 баллов;
- 4 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 8 баллов;
- 5- тяга винтов

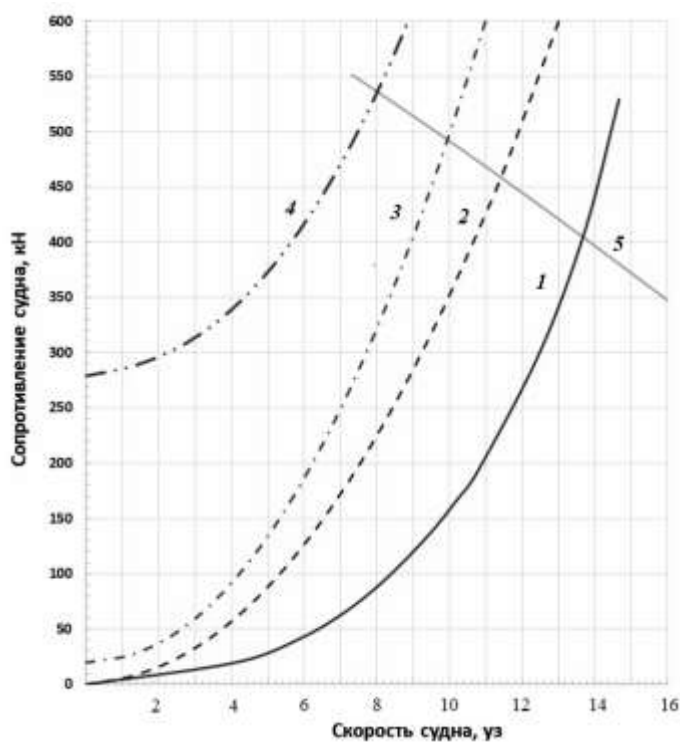


Рис. 12. Кривые полного сопротивления при движении судна кормой:

1 - сопротивление воды и воздуха;

2 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 4 балла;

3 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 6 баллов;

4 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 8 баллов;

5- тяга винтов

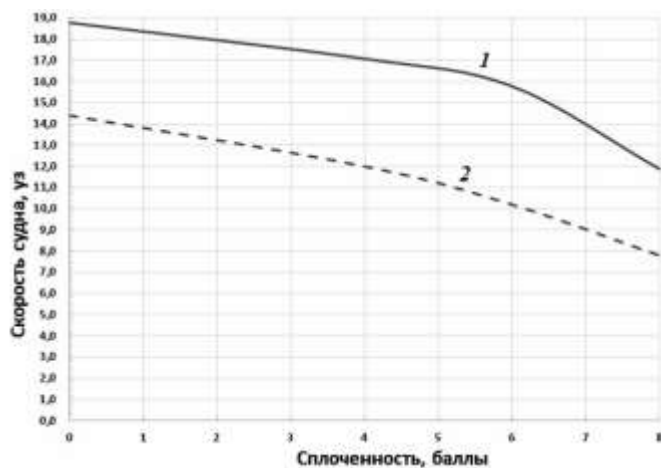


Рис. 13. Кривая достижимых скоростей судна (диаграмма ледопроеходимости) судна при ходе носом (1) и кормой (2) в битом льду толщиной 0,5 м различной сплоченности

Полное сопротивление воды при движении судна кормой вперед значительно выше, чем при движении носом. При движении судна кормой вперед на больших числах Фруда наблюдалось интенсивное волнение. В аналогичных условиях движения носом волнение заметно ниже.

Заключение

На основе проведенных испытаний и результатов исследований ходкости судна на чистой воде и в ледовых условиях были сделаны следующие выводы. При использовании 100% мощности на спокойной глубокой воде при движении судна носом достигается скорость 18,8 узла, при использовании 85% мощности двигателя 18,0 узлов. Сопротивление воды при движении судна носом значительно меньше по сравнению с ходом кормой. Интенсивное волнообразование при ходе судна носом заметно меньше. Прогнозируемая скорость хода при использовании 100% мощности в мелкобитом льду толщиной 0,5 м и сплоченностью 4 балла при движении носом составляет ~17,1 узлов, при сплоченности 6 баллов ~15,8 узлов, при сплоченности 8 баллов ~ 11,9 узлов. Волнообразование при движении судна в ледовых условиях значительно меньше, по сравнению с движением на воде.

Испытания выполнены в соответствии с договором № 21/2547 между АО «Судостроительный завод имени Б.Е. Бутомы» г. Керчь и Нижегородским государственным техническим университетом им. Р.Е. Алексева.

Представленные исследования ледовой ходкости выполнены по проекту № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом» в рамках гранта РФФИ.

Список литературы

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судна.: -СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
2. Zuev V. A., Gramuzov E.M., Appolonov E.M. And Vaganov A.B. Physical simulation of ice cover for investigation into icebreaking ship performance // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET) - Scopus Indexed. Volume: 9, 2018. Issue: 11, Pages:1637-1646.
3. Зуев В.А., Грамузов Е.М. Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов // Полярная механика, №3, 2016. С.31-42.
4. Timco G.W. EG/AD/S/F new type of model ice for refrigerated towing tanks // Cold Regions Science and Technology, Vol. 2, 1986. P. 175-195.
5. Беляков В.Б. Экспериментальные исследования ледопроеходимости судов в новой модели льда // Проектирование средств продления навигации: Межвуз. Сб. Горьков. Политехн. Ин-та. Горький, 1986. С. 79-84.
6. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
7. Сазонов К.Е. Методы коррекции экспериментальных данных по ледовой ходкости судна в модельных и натурных условиях // Полярная механика, №3, 2016. С.406-416.
8. Enkvist E. Ice model tests as a ship design tool/ Proceeding of the IAHN Ice Symposium. 1990.Vol.1. P.15-45. Espoo, Finland.
9. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов.: -СПб.: Судостроение, 2013. – 512 с.

References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya khodkost' sudna.: -SPb.: Sudostroenie, 2001. – 512 s.

- Zuev V. A., Gramuzov E.M., Appolonov E.M. And Vaganov A.B. Physical simulation of ice cover for investigation into icebreaking ship performance // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET) - Scopus Indexed. Volume: 9, 2018. Issue: 11, Pages:1637-1646.
- Zuev V.A., Gramuzov E.M. Novye podkhody k modelirovaniyu ledovoi sredy pri model'nykh ispytaniyakh sudov // Polyarnaya mekhanika, №3, 2016. S.31-42.
- Timco G.W. EG/AD/S/F new type of model ice for refrigerated towing tanks // Cold Regions Science and Technology, Vol. 2, 1986. P. 175-195.
- Belyakov V.B. Ehksperimental'nye issledovaniya ledoprokhodimosti sudov v novoi modeli l'da // Proektirovanie sredstv prodleniya navigatsii: Mezhev. Sb. Gor'kov. Politekhn. In-ta. Gor'kii, 1986. S. 79-84.
- Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh. – L.: Sudostroenie, 1986. – 208 s.
- Sazonov K.E. Metody korrektsii ehksperimental'nykh dannykh po ledovoi khodkosti sudna v model'nykh i naturnykh usloviyakh // Polyarnaya mekhanika, №3, 2016. S.406-416.
- Enkvist E. Ice model tests as a ship design tool/ Proceeding of the IAHR Ice Symposium. 1990.Vol.1. P.15-45. Espoo, Finland.
- Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Proektirovanie ledokolov.: -SPb.: Sudostroenie, 2013. – 512 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Грамузов Евгений Михайлович, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: terkor@nntu.ru

Калинина Надежда Викторовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Ларин Александр Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: alexandr_ks1@mail.ru

Ларина Елизавета Михайловна, ассистент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: rohministrovaliza@mail.ru

Evgeny M. Gramuzov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Shipbuilding and Aviation Technology", Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950

Nadezhda V. Kalinina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Shipbuilding and Aviation Technology", Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950

Alexander G. Larin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Shipbuilding and Aviation Technology", Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950

Elizaveta M. Larina, assistant of the Department "Shipbuilding and Aviation Technology", Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950

Статья поступила в редакцию 17.08.2022; опубликована онлайн 20.12.2022.
Received 17.08.2022; published online 20.12.2022.